Untersuchungen über das Verhalten der Höhenstrahlung beim Durchdringen sehr starker Bleischichten

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
genehmigt von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

von

Ilse Matthes
aus Altena (Westf.)

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juni 1939
Tag der Promotion: 30. Oktober 1939

1 9 3 9

Johann Ambrosius Barth in Leipzig

68

Referenten: Prof. Dr. Kolhörster
Prof. Dr. Debye

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

D 11

Sonderdruck aus „Annalen der Physik“ 5. Folge, Band 36, Heft 5. 1939
Printed in Germany

I. Einleitung

In neuerer Zeit wird allgemein wieder die Ansicht betont, daß die Höhenstrahlung in zwei Komponenten, eine weiche und eine harte, zu zerlegen ist. Dabei wird gewöhnlich angenommen, daß die weiche Komponente aus Elektronen besteht, während über das Wesen der harten Komponente weniger Klarheit herrscht. Auf Grund ihrer außerordentlichen Durchdringungsfähigkeit und der azimutalen Richtungsverteilung hat man vielfach versucht, sie als Protonenstrahlung zu deuten.

Aus seinen theoretischen Überlegungen folgert Bhabha[1]) für Protonen der entsprechend hohen Energie eine Wechselwirkung zwischen Protonen und Neutronen. Danach überträgt ein Proton, das auf seinem Wege durch Materie auf ein Neutron trifft, diesem fast seine gesamte Energie, so daß das Neutron mit kaum verminderter Geschwindigkeit und kaum geänderter Richtung den Weg des Protons fortsetzt, bis es selbst auf ein Proton trifft und der umgekehrte Vorgang stattfindet. Auf diese Weise müßte sich nach einem genügend langen Wege durch Materie ein Gleichgewichtszustand zwischen Protonen und Neutronen einstellen.

Werden nun drei Zählrohre 1, 2 und 3 in vertikaler Ebene angeordnet, so ist für einen Protonenstrahl, der Zählrohr 1 in solcher Richtung durchsetzt, daß er auch die beiden anderen Zählrohre treffen müßte, die Wahrscheinlichkeit, Zählrohr 2 zum Ansprechen zu bringen,

$$(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q d_1}) \cdot \sigma^{-1},$$

unter der Voraussetzung, daß das Zählrohr auf Protonen 100%ig, auf Neutronen dagegen gar nicht anspricht. Dabei sind σ_p und σ_n die Anzahl der Protonen bzw. Neutronen im Kubikzentimeter, $\sigma = \sigma_p + \sigma_n$, q der Wirkungsquerschnitt für die beiden einander inversen Prozesse, d_1 und d_2 der Abstand zwischen Zählrohr 1 und 2 bzw. 2 und 3.

Ebenso ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein solcher Strahl Zählrohr 3 zum Ansprechen bringt

$$(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q (d_1 + d_2)}) \cdot \sigma^{-1} .$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß er die Zählrohre 2 und 3 beide zum Ansprechen bringt, ist dagegen

$$(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q d_1}) \ (\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q d_2}) \cdot \sigma^{-2} .$$

Somit wird das Verhältnis der 3fach-Koinzidenzen 1, 2, 3 zu den 2fach-Koinzidenzen 1, 3

$$\frac{(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q d_1})(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q d_2})}{\sigma (\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q (d_1 + d_2)})}$$

Dieses Verhältnis wird σ_p/σ, wenn $\sigma q d_1 \gg 1$ und $\sigma q d_2 \gg 1$. Es wird 1, wenn $d_1 = 0$ oder $d_2 = 0$. Bhabha ist nun der Meinung, daß Bleistärken von 10 cm, bei denen entsprechende Messungen schon durchgeführt wurden und kein meßbares Ergebnis brachten, nicht genügten, und schlägt vor, die Messungen mit je etwa 50 cm Blei zwischen den Zählrohren zu wiederholen.

II. Vorversuche

Da bei einer derartigen Meßanordnung die zur Verfügung stehenden Intensitäten wegen des großen Abstandes der Zählrohre voneinander sehr klein sind gegenüber den Stoßzahlen der einzelnen Zählrohre, so muß der Verstärker zur Aussiebung der Koinzidenzen ein besonders gutes Auflösungsvermögen aufweisen.

Es wurden zwei Verstärker, ein 3fach-Koinzidenz- und ein 4fach-Koinzidenzverstärker verwendet, bei denen — wie von Mouzon[2]) angegeben — die Eingangshochfrequenzpenthoden bei niedriger Schirmgitterspannung auf einen gemeinsamen Anodenwiderstand arbeiten.

Das Auflösungsvermögen wurde in der üblichen Art durch Auseinanderlegen der Rohre für 2fach- und 3fach-Koinzidenzen bestimmt. Dabei machten sich bei dem verhältnismäßig guten Auflösungsvermögen die großen Luftschauer störend bemerkbar[3]). Um diese Schauer möglichst auszuschalten, wurden die Rohre einzeln mit je 10 cm Pb abgeschirmt. Die Bestimmung des Auflösungsvermögens ergab für 2fach-Koinzidenzen $\tau_2 < 2 \cdot 10^{-5}$ sec und für 3fach-Koinzidenzen $\tau_3 < 5 \cdot 10^{-6}$ sec als Mindestwerte.

Weiter mußte als Vorarbeit für die eigentlichen Messungen die absolute Ansprechwahrscheinlichkeit der Zählrohre geprüft werden. D. h., es mußte untersucht werden, inwieweit jeder ein Zählrohr durchsetzende Höhenstrahl dieses zum Ansprechen bringt. Zu diesem Zweck wurden die Zählrohre möglichst dicht übereinandergebracht, so daß

große Koinzidenzintensitäten erzielt werden konnten. Die Messungen ergaben, daß 98,2 $\pm$ 1,3% der 2fach-Koinzidenzen auch als 3fach-Koinzidenzen gezählt wurden. Da aus Vergleichsmessungen mit größerem Abstand der Zählrohre zu schließen war, daß auch bei der benutzten Anordnung noch Schauer wirksam waren, liegt die Ansprechwahrscheinlichkeit der Zählrohre sicher sehr nahe 1.

III. 3fach-Koinzidenzen mit 90 cm Blei zwischen den Zählrohren

Da sich die Schauerstrahlung aus der Umgebung nie ganz ausschalten läßt, wurden, um definierte und reproduzierbare Verhältnisse zu bekommen, die eigentlichen Messungen in einem Fe-Panzer von 10 cm Wandstärke ausgeführt. Der Panzer war 1,35 m hoch und hatte einen lichten Querschnitt von 130 $\times$ 40 cm^2. Die drei Zählrohre waren in je 55 cm Entfernung voneinander in einer senkrechten Ebene in der Mitte des Panzers angeordnet. Bei den Hauptmessungen war zwischen den Zählrohren je ein Absorber von 45 cm Pb angebracht (Querschnitt des Absorbers 60 $\times$ 10 cm^2). Sie wurden so ausgeführt, daß ein Verstärker abwechselnd die 2fach-Koinzidenzen 1, 3 und die 3fach-Koinzidenzen 1, 2, 3 zählte. Die Umschaltungen erfolgten halb- bis ganzstündlich, und zwar so, daß für beide Meßreihen zu jedem Zeitpunkt die Gesamtzahl der bis dahin gemessenen Koinzidenzen etwa gleich war, die relative Genauigkeit der beiden Reihen also gleichmäßig anstieg. Auf diese Weise sollten systematische Schwankungen der Höhenstrahlungsintensität möglichst ausgeschaltet werden. Das Verhältnis zwischen 2fach- und 3fach-Koinzidenzen erwies sich innerhalb des statistischen Fehlers konstant, obgleich sich die Messungen über längere Zeit erstreckten. Das insgesamt etwa 265 Std. Meßdauer umfassende Ergebnis ist in Tab. 1 zusammengestellt.

Tabelle 1

2fach- und 3fach-Koinzidenzen mit je 90 cm Pb zwischen den Zählrohren

$\frac{\text{2 fach-Koi}}{\text{min}}$	$\frac{\text{3 fach-Koi}}{\text{min}}$	$\frac{\text{3 fach-Koi}}{\text{2 fach-Koi}}$
7890 : 7110 = 1,110 $\pm$ 1,1%	7493 : 8773 = 0,854 $\pm$ 1,2%	0,854 : 1,110 = 0,77 $\pm$ 1,6%

Bei den durch den großen Abstand (55 cm) der Rohre bedingten geringen Intensitäten spielen auch die zufälligen Koinzidenzen schon eine gewisse Rolle. Mit den Mindestwerten des Auflösungsvermögens $\tau_2 \leqq 2 \cdot 10^{-5}$ sec und $\tau_3 \leqq 5 \cdot 10^{-6}$ sec ergibt sich für die zufälligen Koinzidenzen der 2fach-Koinzidenzmessungen $K_{z_2} = 3 \cdot 10^{-2}$ Koi/min oder 2,7% des Meßergebnisses, und für die zufälligen Koinzidenzen der

3fach-Koinzidenzmessungen $K_{z_3} = 7 \cdot 10^{-4}$ Koi/min oder etwa $1\,^0/_{00}$ des Meßergebnisses. Danach reicht der durch zufällige Koinzidenzen bedingte Fehler bei weitem nicht aus, die Differenz zwischen 2fach- und 3fach-Koinzidenzen zu erklären.

Das Ergebnis der Tab. 1 scheint also die Bhabhasche Vermutung zu bestätigen. Es muß jedoch erst näher untersucht werden, in welcher Weise sich die Sekundärwirkungen der Höhenstrahlung, insbesondere die Schauer, bei der benutzten Anordnung auswirkten.

IV. Schauermessungen

1. Verteilung der Schauer im Panzer

Weitere Messungen sollten deshalb die Zahl der Schauer bestimmen, die bei der gegebenen Anordnung auftraten und ihre räumliche Verteilung im Panzer ermitteln. Zu diesem Zweck wurde das mittlere Zählrohr in horizontaler Richtung so weit parallel verschoben, daß es von Einzelstrahlen, die das obere und das untere Zählrohr durchsetzten, nicht mehr getroffen werden konnte. Da der innere Durchmesser der Zählrohre 4,8 cm betrug, wurde es mindestens 5 cm aus der Achse 1, 3 gerückt. Die Messungen sind in Tab. 2 zusammengestellt und in Abb. 1 gezeichnet.

Tabelle 2

Anzahl der Schauerkoinzidenzen in Abhängigkeit von der Lage des mittleren Zählrohres

Horizontalverschiebung von Rohr 2 aus der Achse 1, 3 in cm	Koi/min	Koi/min rechts + links der Achse
5	0,087 ± 10%	
5,3	0,064 ± 7,5%	0,141 ± 5%
6	0,045 ± 9%	
6,5	0,033 ± 15%	
13,3	0,022 ± 13%	
15	0,023 ± 9%	0,030 ± 11%
16,7	0,024 ± 17%	
Rohr 2 außerhalb des Panzers	0,0074 ± 18%	

Die Werte in der letzten Spalte der Tab. 2 wurden erhalten, indem an Stelle des Zählrohres 2 zwei Zählrohre zu beiden Seiten in angegebenem Abstande von der Achse 1, 3 aufgestellt und parallel an ein Eingangsrohr des Verstärkers geschaltet wurden.

Außerdem wurde das Zählrohr 2 auch noch außerhalb des Panzers aufgestellt. Die dabei noch gezählten 0,0074 3fach-Koinzidenzen sind nach obigem Überschlag nur zum Teil als zufällige Koinzidenzen, zum anderen Teil wohl als dieselben ausgedehnten weitreichenden Schauer

zu deuten, die schon die Bestimmung des Auflösungsvermögens erschwerten.

Die × in Abb. 1 geben direkt die Werte aus Tab. 2 wieder. Die ○ dagegen geben die Koinzidenzen je Zentimeter des Durchmessers des Zählrohres 2 wieder. Diese wurden aus den Differenzen der Koinzidenzzahlen bei verschiedenen Stellungen des Zählrohres 2 erhalten, nachdem sie, soweit nötig, auf 1 cm des Durchmessers umgerechnet wurden. Sie geben ein Bild von der Schauerverteilung auch in dem Bereich, in dem direkte Messungen mit den vorhandenen Zählrohren von 4,8 cm Durchmesser nicht möglich waren, weil diese in den Bereich des normalen Strahlenganges hineingereicht hätten. Das □ ergibt sich aus einer Messung, bei der an Stelle des sonst verwendeten Zählrohres 2, das ebenso wie die Zählrohre 1 und 3 4,8 cm Durchmesser hatte, ein dickeres Zählrohr mit 5,8 cm Durchmesser verwendet wurde. Dieses Zählrohr lag mit seiner Mittelachse ebenfalls genau in der vertikalen Ebene der Zähldrähte der Rohre 1 und 3, stand also nach jeder Seite 0,5 cm aus der Bahn der Strahlen heraus, die die Rohre 1 und 3 auf geradlinigem Wege treffen können. Die Messung mit diesem Zählrohr ergab 82% der gleichzeitig gemessenen 2fach-Koinzidenzen oder 0,056 Koi/min mehr als ein normales (4,8 cm Durchmesser) Zählrohr in der gleichen Lage. Dieser Wert von 0,056 Koi/min ist entsprechend der geometrischen Lage (2,65 cm), die ihm zukommt, mit in die Zeichnung aufgenommen worden. Die gute Einordnung zu den aus Tab. 2 gewonnenen Kurvenpunkten deutet darauf hin, daß es sich auch bei diesen Koinzidenzen im wesentlichen nicht um die schon von vielen Autoren erkannten Schauer handeln kann, die vom Primären herrühren, die gleichzeitig die Rohre 1 und 3 durchsetzen. Denn da in einem solchen Falle der Primärstrahl auch ein normal großes Rohr in Lage 2 zum Ansprechen bringen würde, könnten die 3fach-Koinzidenzen nicht dadurch vermehrt werden, daß das mittlere Rohr durch ein größeres ersetzt wird.

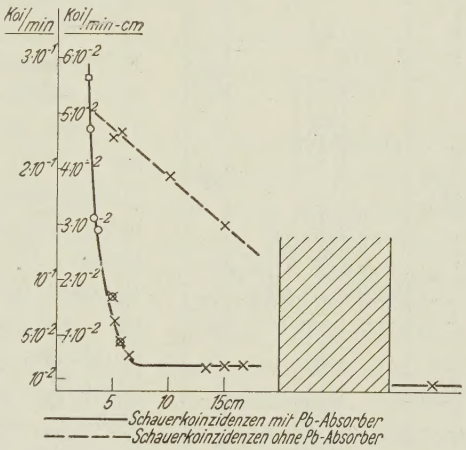

Abb. 1

2. Addierbarkeit der Schauer

Zu dem gleichen Ergebnis führt folgende Meßserie. Es wurde dieselbe Anordnung benutzt wie bei der ersten Meßreihe, nur daß neben das Zählrohr 2, das jetzt als Rohr 2b bezeichnet werde, noch 2 Zählrohre (2a und 2c) im Abstand 5,3 bzw. 15 cm gelegt wurden (Abb. 2). Diese Rohre wurden an dasselbe Eingangsrohr des Verstärkers und über denselben Widerstand geschaltet wie das Rohr 2b. Diese Eingangsstufe allein betrachtet zählte so die Einzelstöße aller drei Rohre. Der Verstärker in 3fach-Koinzidenzschaltung zählte also sowohl die „Schauerkoinzidenzen" 1, 2(a, c), 3 als auch die vertikalen 3fach-Koinzidenzen 1, 2(b), 3, soweit nicht die Schauerkoinzidenzen als gleichzeitiges Ereignis neben den vertikalen Koinzidenzen auftraten. Die starke Erhöhung der Einzelstoßzahl im mittleren Rohraggregat hat nur geringen Einfluß auf die Zahl der Zufallskoinzidenzen, weil die Zahl der 2fach-Koinzidenzen in den beiden äußeren Rohren, die nicht gleichzeitig 3fach-Koinzidenzen sind, sehr klein ist. Mit den neuen Einzelstoßzahlen ergibt sich für die Zufallskoinzidenzen

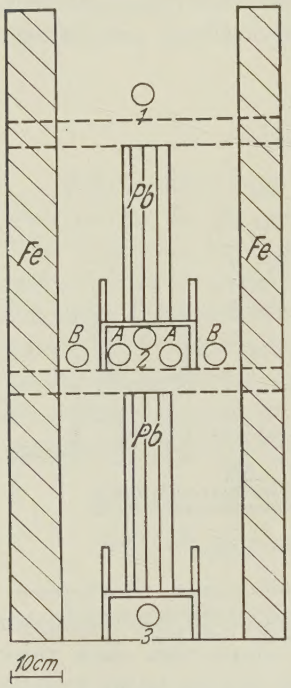

Abb. 2

$$K_{z_3} = 8 \cdot 10^{-4}\ \text{Koi/min},$$

also jedenfalls ein vernachlässigbarer Betrag.

Die Messungen wurden ebenso ausgeführt wie die früheren. Es wurden diesmal abwechselnd die 3fach-Koinzidenzen 1, 2 (a, b, c), 3 und die 2fach-Koinzidenzen 1, 3 gemessen und außerdem zum Vergleich Messungen der 3fach-Koinzidenzen 1, 2(b), 3 eingeschaltet.

Tabelle 3

Abstand der Rohre 2a und 2c aus der Achse 1, 3 in cm		3fach-Koinzidenzen			2fach-Koinzidenzen	V Spalte II + III
		I Koi/min 1, 2 (a, b, c), 3	II Koi/min 1, 2(b) 3	III Koi/min 1, 2(a, c), 3	IV Koi/min 1, 3	
A	5,3	0,963 ± 1,6%	0,866 ± 1,5%	0,141 ± 5%	1,110 ± 1,1%	1,007
B	15	0,885 ± 2%	0,849 ± 2%	0,030 ± 11%	1,110 ± 1,1%	0,879

Außerdem wurden noch die Schauer-3fach-Koinzidenzen 1, 2(a, c), 3 in jeweils einem längeren Meßgang bestimmt, welche Werte in Tab. 2 mit enthalten sind. Diese Messungen sind in Tab. 3 zusammengestellt.

In Tab. 4 sind die 3fach-Koinzidenzen in Prozent der 2fach-Koinzidenzen ausgedrückt.

Tabelle 4

Stellung	I/IV $\frac{1, 2(a, b, c), 3}{1, 3}$	II/IV $\frac{1, 2(b), 3}{1, 3}$	III/IV $\frac{1, 2(a, c), 3}{1, 3}$	II/IV + III/IV
A	86%	78%	13%	91%
B	79%	76%	3%	79%

Aus dem Vergleich der Spalten I, II und III geht eindeutig hervor, daß es sich bei den gemessenen [1, 2(a, c), 3]-3fach-Koinzidenzen zum größeren Teile nicht um solche Schauer handeln kann, die gleichzeitig mit den vertikalen 3fach-Koinzidenzen auftreten. Es ist vielmehr zwischen folgenden zwei Vorgängen zu unterscheiden: 1. Die normalen 3fach-Koinzidenzen [1, 2(b), 3] sind auf einzelne Höhenstrahlenteilchen zurückzuführen, die die 90 cm Pb anscheinend unverändert durchdringen. 2. Treten außerdem noch solche Ereignisse auf, bei denen das obere und das untere Zählrohr von ionisierenden Strahlen getroffen werden, das zwischen ihnen liegende Zählrohr 2b dagegen nicht, sondern ein daneben liegendes Rohr 2a oder 2c. Ein Ausfüllen des Panzerquerschnittes mit Zählrohren würde zeigen, ob die gesamte Differenz zwischen den Koinzidenzen 1, 3 und den Koinzidenzen 1, 2(b), 3 auf diese Weise zu erklären ist. Dies war aus technischen Gründen nicht möglich. Aber unter Benutzung der Messungen mit dem 5,8 cm-Durchmesserrohr kann das Ergebnis einer solchen Messung mit ausreichender Sicherheit abgeschätzt werden.

3. Abschätzung des Einflusses der Schauer auf das Ergebnis von III

Abb. 3 gibt die Lage der Zählrohre 2a, b und c in Stellung *A* mit ihren Horizontalabständen voneinander wieder. (Die geringe Verschiebung des Rohres 2b nach oben war aus technischen Gründen notwendig.) Wie aus der Zeichnung ersichtlich ist, war der Raum zwischen den Rohren 2a und 2c 5,8 cm breit, entsprach also dem Innendurchmesser des oben erwähnten Zählrohres, das in 3fach-Koinzidenzenzschaltung 82% (Ziffer 1) der 2fach-Koinzidenzen 1, 3 lieferte. Rechnet man dazu die 8% Erhöhung der 3fach-Koinzidenzen, die durch das Dazuschalten der Rohre 2a und 2c erreicht wurden (Tab. 4), so sind im Gedankenexperiment bereits 90% der 2fach-Koinzidenzen

1, 3 als 3fach-Koinzidenzen 1, 2, 3 nachgewiesen, wobei 15,4 cm von den 40 cm lichten Durchmessers des Panzers lückenlos erfaßt sind. Legt man für die restlichen 24,6 cm als Mittelwert das Meßergebnis von Stellung B zugrunde, was nach Abb. 1 eine gute Näherung sein dürfte, so sind noch weitere $3 \times 24{,}6/2 \times 4{,}8 = 8\%$ (Tab. 2) hinzuzurechnen, insgesamt also 98% nachgewiesen. Es ist demnach zu

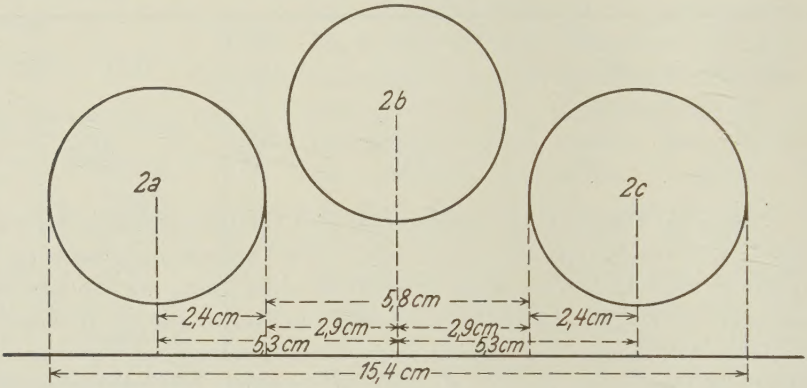

Abb. 3

erwarten, daß bei Ausfüllen des ganzen Panzerquerschnittes mit Zählrohren 98% der 2fach-Koinzidenzen auch als 3fach-Koinzidenzen gemessen werden könnten. Unter Berücksichtigung der Zufallskoinzidenzen, die durch endliches Auflösungsvermögen bedingt sind und nach obigem Überschlag etwa 3% ausmachen dürften, bedeutet das eine vollständige Erfassung der Strahlen.

Die bisherigen Messungen lassen zwei Deutungen zu:

1. 23% (Tab. 4) der durch die Zählrohre 1 und 3 ausgeblendeten Strahlen durchsetzen Zählrohr 2 bzw. 2b als nicht ionisierende Strahlen (Neutronen). Gleichzeitig mit diesen sind aber in der Umgebung des Zählrohres 2 so viel ionisierende Schauerstrahlen vorhanden, daß jeweils mindestens ein in der gleichen horizontalen Ebene gelegenes Zählrohr von einem solchen Schauerstrahl getroffen wird, wenn ein Neutron Zählrohr 2 durchsetzt.

Oder 2. Von den Höhenstrahlen, die durch die 2fach-Koinzidenzen 1, 3 gezählt werden, sind höchstens 77% geradlinig verlaufende Einzelstrahlen, die wegen der geometrischen Anordnung auch Zählrohr 2 durchsetzen. Die übrigen 23% werden durch solche Ereignisse verursacht, bei denen mehr als ein Strahl auftritt und die allgemein als Schauer bezeichnet sein mögen.

Zur ersten Möglichkeit ist zu bemerken, daß nur gerade Neutronen von solchen Schauern begleitet sein sollten. Denn wie aus Tab. 4

ersichtlich ist, würden dann die 22% Strahlen, die Zählrohr 2b als Neutronen durchsetzen, 8% (oder 36% der Neutronen) Schauerstrahlen durch die Rohre 2a und 2c schicken, während die restlichen 78% Strahlen, die Zählrohr 2b als ionisierende Strahlen (Protonen) durchsetzen, nur zu 5% (oder 6,4% der Protonen) von ebensolchen Schauern begleitet sind. Ein solches Verhalten der Neutronen ist nach der Theorie nicht zu erwarten. Die Tatsache, daß die 78% ionisierender Strahlen von einer mäßigen Anzahl Schauer begleitet sind, ist dagegen in vollkommenem Einklang mit der bekannten Erscheinung der Schauer, deren Eigenschaften z. B. mit Hilfe der Rossikurve schon viel untersucht worden sind.

Geht man andererseits von der eher verständlichen Voraussetzung aus, daß Neutronen und Protonen in gleichem Verhältnis von Schauern begleitet sind, so wäre das Verhältnis von Protonen zu Neutronen 5 : 8 oder $\sigma_p/\sigma = 5/13 = 0{,}38$. Dann müßten $100 - 23 - 5/8 \cdot 23 =$ 63% der Höhenstrahlung aus anderen ionisierenden Strahlen bestehen, die keine erhebliche Schauerstrahlung erzeugen.

Um die zweite Deutungsmöglichkeit näher zu diskutieren, sollen erst weitere Versuche beschrieben werden, die über den Strahlengang in diesen Schauern weitere Schlüsse ermöglichen. Es sei jedoch hervorgehoben, daß der überwiegende Teil der Schauerkoinzidenzen in der Nähe des Zählrohres 2b gefunden wurde.

V. 3fach-Koinzidenzen und Schauermessungen ohne Blei

1. 3fach-Koinzidenzen

Um den Einfluß des Bleies bei diesen Messungen zu erkennen, wurden weitere Messungen mit denselben Zählrohranordnungen und in demselben Panzer, aber ohne den Pb-Panzer zwischen den Zählrohren, vorgenommen. Jetzt standen zwei Verstärker zur Verfügung, so daß die 3fach- und die 2fach-Koinzidenzen *gleichzeitig* gemessen werden konnten. Dabei waren die Zählrohre so an die beiden Verstärker geschaltet, daß von jedem Zähldraht die negativen Stöße durch zwei besondere Kapazitäten von je 25 cm auf die Gitter je einer Eingangspenthode gebracht wurden. Gegebenenfalls wurden wieder an Stelle des Zählrohres 2 drei Zählrohre 2a, b und c parallel geschaltet.

Tabelle 5

2fach- und 3fach-Koinzidenzen ohne Pb

	2fach-Koi / min	3fach-Koi / min	3fach-Koi / 2fach-Koi
ohne Pb . .	2,48 ± 1,0%	1,91 ± 1,2%	0,77 ± 1,6%
mit Pb. . .	1,110 ± 1,1%	0,854 ± 1,2%	0,77 ± 1,6%

Die Intensitäten sind bei diesen Messungen selbstverständlich größer; aber das Verhältnis von 3fach-Koinzidenzen zu 2fach-Koinzidenzen ist überraschenderweise dasselbe (Tab. 5).

2. Schauermessungen

Die Verteilung der Schauer im Panzer ist dagegen eine andere, wie Tab. 6 und Abb. 4 zeigen (zum Vergleich Tab. 2 und Abb. 1).

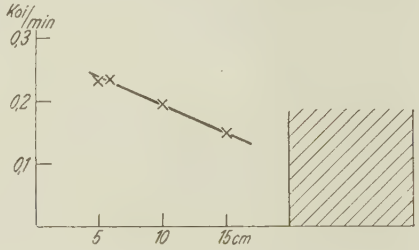

Abb. 4

Tabelle 6

Anzahl der Schauerkoinzidenzen in Abhängigkeit von der Lage des mittleren Zählrohres

Horizontalverschiebung von Rohr 2 aus der Achse 1, 3 in cm	Koi/min	Koi/min rechts + links der Achse
5	0,228 ± 3%	
5,3		0,34 ± 11%
6	0,235 ± 4%	
10	0,194 ± 7%	
15	0,152 ± 7%	0,26 ± 5%

Die Messungen, bei denen an Stelle des Rohres 2 drei Rohre, 2a, b und c, geschaltet waren, ergaben ebenfalls ein ähnliches Bild wie diejenigen mit dem Pb-Absorber zwischen den Zählrohren (Tab. 7) (zum Vergleich Tab. 3 und 4).

Tabelle 7

Abstand der Rohre 2a und 2c aus der Achse 1, 3 in cm	3fach-Koinzidenzen			2fach-Koinzidenzen	V Spalte II + III
	I Koi/min 1, 2(a, b, c), 3	II Koi/min 1, 2(b), 3	III Koi/min 1, 2(a, c), 3	IV Koi/min 1, 3	
A 5,3	2,21 ± 1,9%	1,93 ± 1,8%	0,34 ± 11%	2,58 ± 1,7%	2,27
				2,54 ± 1,6%	
B 15	2,09 ± 1,3%		0,26 ± 5%	2,55 ± 1,2%	2,19

Tabelle 8

Die 3fach-Koinzidenzen in Prozent der 2fach-Koinzidenzen

Stellung	I/IV $\frac{1, 2(a, b, c), 3}{1, 3}$	II/IV $\frac{1, 2(b), 3}{1, 3}$	III/IV $\frac{1, 2(a, c), 3}{1, 3}$	II/IV + III/IV
A	86%	76%	18%	94%
B	82%	76%	10%	86%

3. Vergleich zwischen den Messungen mit und ohne Blei

Aus den bisher beschriebenen Messungen (Tabellen 1, 3, 4, 5, 7 und 8) geht hervor, daß sowohl bei den Messungen mit wie bei denen ohne Pb-Absorber zwischen den Zählrohren ein Anteil von etwa 24% der Gesamtintensität aus solchen Strahlen bzw. Strahlengruppen besteht, die zwar ein Zählrohr innerhalb des durch die äußeren Zählrohre ausgeblendeten Strahlenkegels nicht zum Ansprechen bringen, dafür aber ein solches außerhalb desselben. Während dieses Ergebnis für die Messungen ohne Pb leicht auf die bekannte Erscheinung der Schauer zurückgeführt werden könnte, erscheint es für die Messungen mit Pb weniger leicht verständlich, weil den Schauern dann eine sehr große Durchdringungsfähigkeit zugeschrieben werden müßte, die mit den bisherigen Erfahrungen nicht in Einklang zu bringen ist. Denn der Schauer müßte in der Umgebung des Rohres 2 oder noch höher entstehen und hätte nach der Geometrie der Anordnung (Abb. 2) noch 45 cm Pb zu durchdringen, damit auch Zählrohr 3 zum Ansprechen gebracht wird.

VI. Untersuchung auf weiche Schauerstrahlung

Die Verschiedenartigkeit der Schauerverteilung mit und ohne Pb ließ die Vermutung zu, daß der von Rossi[5]) entdeckte und von Geiger, Fünfer, Zeiller, Heidel und Schwegler[6]) näher untersuchte Rückstrahleffekt wesentlichen Einfluß auf die Meßresultate haben könnte. Abb. 5 zeigt, wie der eiserne Träger, der bei den Messungen mit Pb verwendet wurde, und bei denen ohne Pb, um möglichst jede Materie zu vermeiden, fortgelassen wurde, weiche Sekundärstrahlen, die am Boden des Panzers ausgelöst werden können, im einen Falle absorbieren kann, und wie er andererseits auch den Ort für ihre Entstehung bilden kann.

Da nach Messungen von Heidel[7]) u. a. der Rückstrahleffekt an Al vernachlässigbar klein ist gegenüber dem an Fe, wurde die Frage zunächst dadurch geprüft, daß der Boden mit einer 1 cm starken Al-Platte belegt wurde, wodurch die Rückstrahlung um etwa die Hälfte vermindert werden müßte. Auf diese Weise ausgeführte Messungen

mit verschiedener Zählrohranordnung ergaben jedoch keinen merkbaren Unterschied gegenüber denen ohne Al.

Für eine weitere Meßreihe wurde an Stelle des Fe-Trägers ein kleiner Fe-Panzer von verschiedener Weite um Zählrohr 3 aufgebaut. Auch dieser hatte keinen Einfluß auf die Anzahl der Schauerkoinzidenzen in verschiedenen Stellungen.

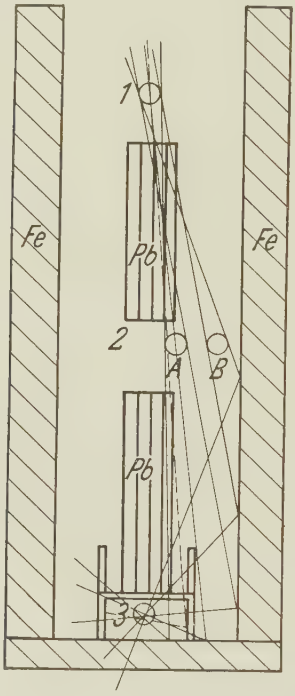

Abb. 5

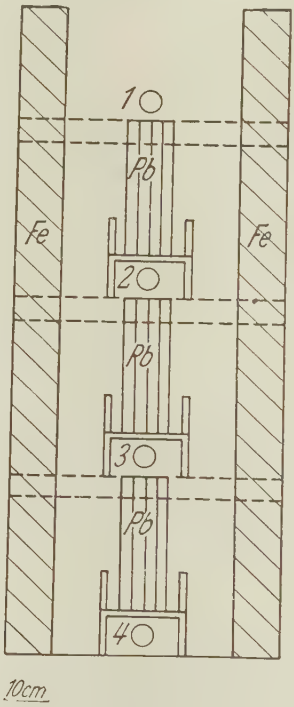

Abb. 6

VII. 4fach-Koinzidenzen. Zerlegung in gradlinige Strahlen und Schauer

1. In vertikaler Anordnung

Da die nähere Umgebung des Zählrohres 3 offenbar keinen wesentlichen Einfluß auf die beobachteten Erscheinungen hat (Abschnitt VI), können weiche Strahlen aus der Umgebung dieses Zählrohres nicht zur Deutung des Effektes herangezogen werden. Wenn er trotzdem auf Schauer zurückgeführt werden soll, müssen diese also aus sehr durchdringungsfähigen Strahlen bestehen, die zumindest einen Teil des 90 cm starken Pb-Absorbers zu durchsetzen vermögen. Aus der Winkelverteilung der Schauer besonders bei den Messungen mit Pb-Absorber

ist zu schließen, daß diese Art von Strahlen auch einen beträchtlichen Anteil der 3fach-Konzidenzen ausmachen, wenn die 3 Rohre in einer Achse angeordnet sind, bei der Anordnung also, deren 3fach-Konzidenzen wir bisher als von geradlinig verlaufenden Primärstrahlen allein herrührend angesehen haben. Es würde sich dann um Schauer mit sehr kleinem Divergenzwinkel handeln. Um diese Verhältnisse näher zu untersuchen, wurde eine 4fach-Koinzidenzanordnung so aufgebaut, daß dieselbe Pb-Dicke, die vorher auf die beiden Zählrohrabstände 1, 2 und 2, 3 gleichmäßig verteilt war, jetzt in den 3 Zählrohrabständen 1, 2; 2, 3 und 3, 4 gleichmäßig verteilt untergebracht werden konnte. Dazu mußte der Abstand zwischen dem obersten (1) und dem untersten (4) Zählrohr von 110 cm auf 120 cm vergrößert werden (Abb. 6), wodurch die Intensitäten etwas herabgesetzt, im wesentlichen aber nichts geändert wurde.

In dieser Anordnung wurden sowohl ohne wie mit Pb-Absorber die 2fach-Koinzidenzen 1, 4 gemessen und gleichzeitig abwechselnd die 3fach-Koinzidenzen 1, 2, 4 und 1, 3, 4 und die 4fach-Koinzidenzen 1, 2, 3, 4. Tab. 9 zeigt die Intensitäten der 3fach- und 4fach-Koinzidenzen im Verhältnis zu den 2fach-Koinzidenzen. Die Intensität der 2fach-Koinzidenzen 1, 4 betrug dabei 2,041 $\pm$ 6‰ Koi/min ohne Absorber und 0,891 $\pm$ 7‰ Koi/min mit Absorber.

Tabelle 9

3fach- und 4fach-Koinzidenzen im Verhältnis zu den 2fach-Koinzidenzen

$B_2 = \frac{1,2,4}{1,4}$	$B_3 = \frac{1,3,4}{1,4}$	$C = \frac{1,2,3,4}{1,4}$	
0,755 $\pm$ 1,7%	0,750 $\pm$ 1,6%	0,686 $\pm$ 0,9%	ohne Pb
0,768 $\pm$ 0,7%	0,764 $\pm$ 0,5%	0,681 $\pm$ 1,6%	mit Pb

Diese Methode, die 3fach- und 4fach-Koinzidenzen grundsätzlich gleichzeitig mit den 2fach-Koinzidenzen zu messen und in Bruchteilen von diesen auszudrücken, hat erstens den Vorteil, daß dadurch alle Schwankungen der Höhenstrahlungsintensität, wie sie etwa durch den Barometereffekt und magnetische Störungen entstehen, für den Vergleich der einzelnen Werte ausgeschaltet werden und zweitens, daß diejenigen 2fach-Koinzidenzen, die nicht auch 3fach- bzw. 4fach-Koinzidenzen sind, praktisch direkt gezählt werden, also nicht als Differenz zweier mit statistischem Fehler behafteten Werte gewonnen werden. Dadurch ist die Genauigkeit ihrer Messung erheblich verbessert, was dann von Vorteil ist, wenn wie im folgenden gerade aus ihrer Anzahl Schlüsse gezogen werden müssen.

Aus Tab. 9 ist erstens zu ersehen, daß sich die Koinzidenzen 1, 2, 4 von den Koinzidenzen 1, 3, 4 meßbar nicht unterscheiden, die Abstände des mittleren Zählrohres zwischen den beiden äußeren, also ohne Einfluß auf die Zahl der 3fach-Koinzidenzen ist. Weiter zeigt die Tabelle, daß noch ein erheblicher Teil der 3fach-Koinzidenzen nicht als 4fach-Koinzidenzen nachgewiesen werden können. Dadurch wird die Vermutung bestätigt, daß noch ein erheblicher Teil der 3fach-Koinzidenzen nicht auf geradlinig verlaufende Einzelstrahlen zurückzuführen ist. Mit den von der 4fach-Koinzidenzanordnung gelieferten Werten läßt sich nun die Zahl der Schauer von der der Primärstrahlen, d. h, der geradlinig durch alle Rohre hindurch gegangenen Strahlen, trennen. Die Zahl der Primären, die geradlinig die Zählrohre 1—4 durchsetzen, sei N und die Zahl der Schauer, die die Zählrohre 1 und 4 zum Ansprechen bringen, sei N', dann ist die Zahl der 2fach-Koinzidenzen 1, 4

(1) $$A = N + N', \text{ die} = 1 \text{ gesetzt sei}.$$

Bezeichnet man weiter die Wahrscheinlichkeit, daß auch Zählrohr 2 bzw. 3 von einem Schauer, der die Rohre 1 und 4 trifft, getroffen wird, mit w, so sind unter Berücksichtigung der Tatsache, daß $B_2 = B_3 = B$ (Tab. 9)

(2) die Zahl der 3fach-Koinzidenzen $B = N + N' w$,

(3) die Zahl der 4fach-Koinzidenzen $C = N + N' w^2$.

Aus diesen drei Gleichungen lassen sich N, N' und w aus den gemessenen Werten für B und C bestimmen (Tab. 10).

Tabelle 10

N	N'	w	
$0{,}66 \pm 0{,}02$	$0{,}34 \pm 0{,}02$	$0{,}27 \pm 0{,}03$	ohne Pb
$0{,}63 \pm 0{,}02$	$0{,}37 \pm 0{,}02$	$0{,}36 \pm 0{,}04$	mit Pb

Gegen obigen Ansatz ist allerdings einzuwenden, daß die benutzte Definition der Treffwahrscheinlichkeit nur zulässig ist, wenn nicht zwei Rohre der Anordnung von ein und demselben Strahl des Schauers getroffen werden können. Diese Bedingung ist nach der Geometrie der Anordnung nicht erfüllt. Würden die Schauerkoinzidenzen z. B. dadurch entstehen, daß ein Primärstrahl zwei bzw. 3 nebeneinanderliegende Rohre trifft und das dritte bzw. vierte Rohr durch einen von ihm ausgelösten Schauerstrahl zum Ansprechen gebracht wird, so würden die obigen Folgerungen in der Tat zu falschen Schlüssen führen. Darum wurde die folgende Kontrollmessung ausgeführt, die obige Resultate bestätigt.

2. In Schaueranordnung

Es wurden die Rohre 2 und 3 je 5,3 cm, aber nach links und rechts in horizontaler Richtung aus ihrer Normallage gerückt. Auch hier wurden die 3fach- und 4fach-Koinzidenzen gleichzeitig mit den 2fach-Koinzidenzen 1, 4 gemessen. Die 3fach- und 4fach-Koinzidenzen geben jetzt nur die Zahl der Schauer ohne die Primärstrahlen an. Bei dieser Anordnung war es nicht möglich, daß ein einzelner Strahl drei Rohre traf. Auch der Vorgang, daß je zwei Strahlen zwei Rohre trafen, war sehr unwahrscheinlich, da der Winkel zwischen den beiden Strahlen dann einerseits sehr klein, ihre Richtung andererseits nicht vertikal angenommen werden müßte. Die bei diesen Messungen erhaltenen Werte für die 3fach- und 4fach-Koinzidenzen, die Zahl der Koinzidenzen 1, 4 gleich 1 gesetzt, gibt Tab. 11 an.

Tabelle 11

	$b = \frac{\text{3fach-Koi}}{\text{2fach-Koi}}$	$c = \frac{\text{4fach-Koi}}{\text{2fach-Koi}}$	
ohne Pb	$0{,}102 \pm 2\%$	$0{,}031 \pm 6\%$	Rohr 2 und 3 nach rechts und links aus dem Hauptstrahlengang gerückt
mit Pb	$0{,}055 \pm 5\%$	$0{,}0047 \pm 14\%$	
„ „	$0{,}051 \pm 7\%$	$0{,}015 \pm 9\%$	Rohr 2 und 3 nach der gleichen Seite aus dem Hauptstrahlengang gerückt
„ „		$0{,}003 \pm 20\%$	Rohr 3 außerhalb des Panzers

Nach obigem Ansatz ist $b = N' w$ und $c = N' w^2$ zu setzen. Daraus ergeben sich die Werte der Tab. 12 für N' und w, die für die Messungen ohne Pb gut mit denen aus Tab. 10 übereinstimmen. Sie sind jedoch nur als Kontrolle zu bewerten, da einerseits die Treffwahrscheinlichkeit für die aus der Achse gerückten Rohre kleiner sein wird als für die Rohre in Normallage, wie Abb. 4 und Tab. 6 zeigen, andererseits bei den zuletzt beschriebenen Messungen auch die Schauer mitgezählt wurden, die als Sekundäreffekte der durch die Rohre 1 und 4 ausgeblendeten Primären anzusehen sind.

Tabelle 12

	N'	w	
ohne Pb	$0{,}34 \pm 0{,}03$	$0{,}30 \pm 0{,}03$	Rohr 2 und 3 nach rechts u. links gerückt
mit Pb	$0{,}64 \pm 0{,}16$	$0{,}085 \pm 0{,}02$	„ 2 „ 3 „ „ „ „ „
„ „	$0{,}23 \pm 0{,}05$	$0{,}24 \pm 0{,}04$	Rohr 2 und 3 nach derselben Seite gerückt

Wie Tab. 7 zeigt, ist ihre Zahl rund 0,1 Koi/min, nämlich die Differenz zwischen Spalte V und Spalte I. Für die Messungen mit Pb

zwischen den Rohren sind diese die Kontrolle störenden Effekte erheblich größer (Tab. 2, Abb. 1 und Tab. 3). Trotzdem reichen sie auf den ersten Blick kaum aus, um die sehr erhebliche Diskrepanz zwischen den Werten der Tab. 12 und denen der Tab. 10 zu erklären. Beachtet man jedoch die Steilheit der Kurve Abb. 1, so erscheint das Ergebnis der letzten Messung nicht so sehr verwunderlich. Vielmehr deutet die geringe Zahl der 4fach-Koinzidenzen bei dieser Anordnung darauf, daß der einzelne Schauer nicht gleichmäßig nach beiden Seiten streut, sondern sich nur entweder nach rechts oder nach links über wenige Grade erstreckt. Deshalb wurde die Versuchsreihe mit Pb bei sonst gleicher Anordnung wiederholt, wobei jedoch Rohr 2 und Rohr 3 nach der gleichen Seite um 5,3 cm aus dem Strahlengang gerückt wurden (Tab. 11). Bei den sehr geringen Intensitäten der so erhaltenen 4fach-Koinzidenzen ist ein Nulleffekt zu berücksichtigen, der auftritt, wenn eins der mittleren Rohre außerhalb des Panzers aufgestellt wird und der auf die obenerwähnten ausgedehnten, durchdringenden Schauer zurückzuführen ist. Die so gewonnenen Werte für N' und w (Tab. 12) stimmen unter Berücksichtigung der statistischen und der systematischen Fehlerquellen (Winkelverteilung) genügend gut mit den zu erwartenden (Tab. 10) überein, so daß auch für die Anordnung mit Pb die Deutung durch durchdringungsfähige Schauer nicht widerlegt ist.

VIII. Zusammenfassende Diskussion

1. Deutung der 4fach-Koinzidenzmessung im Sinne der Theorie der Wechselwirkung zwischen Protonen und Neutronen

Die Ergebnisse der vertikalen 4fach-Koinzidenzanordnung lassen sich auch im Sinne des Bhabhaschen Mechanismus deuten. In Abschnitt IV, 3 wurde auf Grund dieser Theorie aus der Zahl der Schauer geschlossen, daß 37% der primären Höhenstrahlung aus einem von zahlreichen Schauern begleiteten Gemisch von Protonen und Neutronen in Wechselwirkung besteht, in dem der Anteil der Protonen etwa 40% ausmacht, die übrigen 63% jedoch anderer Natur sind und keine Schauer erzeugen. Dann wird die Wahrscheinlichkeit, daß vier Zählrohre von ionisierenden Strahlen getroffen werden, kleiner sein als die, daß deren drei getroffen werden. Entsprechend den Überlegungen in Abschnitt I und mit denselben Bezeichnungen wie dort wird die Wahrscheinlichkeit für eine 3fach-Koinzidenz in diesem Falle

$$(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q d_1})(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q (d_2 + d_3)}) \cdot \sigma^{-2}$$

bzw.

$$(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q (d_1 + d_2)})(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q d_3}) \cdot \sigma^{-2},$$

für eine 4fach-Koinzidenz dagegen

$$(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q d_1})(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q d_2})(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q d_3}) \cdot \sigma^{-3},$$

während die Wahrscheinlichkeit für eine 2fach-Koinzidenz jetzt

$$(\sigma_p + \sigma_n e^{-\sigma q (d_1 + d_2 + d_3)}) \cdot \sigma^{-1}$$

zu schreiben ist, wobei d_1, d_2 und d_3 die Abstände der Rohre 1 und 2, 2 und 3 und 3 und 4 bedeuten.

Für $\sigma q d_1 \gg 1$, $\sigma q d_2 \gg 1$ und $\sigma q d_3 \gg 1$ wird das Verhältnis der 3fach-Koinzidenzen ebenfalls

$$\frac{K_{1,2,4}}{K_{1,4}} = \frac{K_{1,3,4}}{K_{1,4}} = \frac{\sigma_p}{\sigma},$$

während das Verhältnis der 4fach-Koinzidenzen zu den 2fach-Koinzidenzen $\frac{K_{1,2,3,4}}{K_{1,4}} = \left(\frac{\sigma_p}{\sigma}\right)^2$ wird. Diese Beziehungen gelten nur für denjenigen Anteil der Höhenstrahlung, der aus einem Gemisch von Protonen und Neutronen in Wechselwirkung besteht und der in Abschnitt IV, 3 auf 37% geschätzt wurde. Für die gesamte primäre Höhenstrahlung gilt dann unter Verwendung der Bezeichnungen der Tab. 9 (mit $B_2 = B_3 = B$):

$$K + \frac{\sigma_p}{\sigma}(1 - K) = B$$

$$K + \left(\frac{\sigma_p}{\sigma}\right)^2 (1 - K) = C,$$

wobei K der unverändert durch das Pb hindurchgehende Anteil der Höhenstrahlung ist. Mit den Werten der Tab. 9 für B und C ergeben sich $\frac{\sigma_p}{\sigma} = 0{,}36$ und $K = 0{,}63$.

Bei dieser letzten Überlegung ist nicht wie in Abschnitt IV, 3 eine Voraussetzung über die die primäre Höhenstrahlung begleitenden Schauer gemacht, sondern es werden nur die aus der Wechselwirkung zwischen Protonen und Neutronen sich ergebenden Ansprechwahrscheinlichkeiten benutzt und ein weiterer, nicht an der Wechselwirkung beteiligter Anteil der Höhenstrahlung angenommen. Wenn beide Überlegungen zu so gut übereinstimmenden Resultaten führen, so spricht das auch für die Richtigkeit der Voraussetzungen über die Schauererzeugung. Wenn sich also die Theorie über die Wechselwirkung von Protonen und Neutronen in der Höhenstrahlung bestätigen sollte, so ist weiter zu schließen, daß diese Protonen und Neutronen im gleichen Verhältnis von Schauern begleitet sind und daß der restliche Anteil der Höhenstrahlung, der etwa aus schweren Elektronen

bestehen könnte, nicht oder nur sehr unwesentlich an der Schauererzeugung beteiligt ist.

Das Ergebnis der Messungen ohne Pb, das sowohl für 3fach- wie für 4fach-Koinzidenzen fast ebenso ausgefallen ist wie mit Pb, kann jedoch nicht im Sinne dieser Theorie gedeutet werden. Wenn nämlich entgegen der Bhabhaschen Berechnung schon $d = 40$ cm Luft genügten, um die Bedingung $\sigma q d \gg 1$ zu erfüllen, hätten die von Bhabha[1]) angeführten Clayschen Messungen mit $d = 10$ cm Pb auch zu einem meßbaren Ergebnis führen müssen. Es bleibt nur die Erklärung, daß bei den Messungen ohne Pb in der in Abschnitt VII ausgeführten Weise Schauer wirksam sind, die zufällig für die verwendeten geometrischen Verhältnisse das Verhältnis zwischen 3fach- und 2fach-Koinzidenzen und zwischen 4fach- und 2fach-Koinzidenzen ebenso beeinflussen wie die Wechselwirkung zwischen Protonen und Neutronen in schwerer Materie.

2. Folgerungen im Sinne der Schauertheorie

Andererseits besteht die Möglichkeit, auch das Ergebnis der Messungen mit Pb durch Schauer zu erklären. Als Grundlage für die Auswertung der 4fach-Koinzidenzmessungen war in Abschnitt VII eine Zerlegbarkeit der Gesamtintensität in geradlinig verlaufende Einzelstrahlen und Schauer vorausgesetzt. Diesen Schauern sind dann allerdings drei charakteristische Eigenschaften zuzuschreiben, die sie von den bereits bekannten Schauertypen unterscheiden.

a) *Winkeldivergenz*

Die Schauer streuen über einen nur sehr kleinen Winkelbereich, wie Abb. 1 und Tab. 11 zeigen. Nach Messungen von Held[6a]) liegt für weiche Schauer das Maximum der Schauerhäufigkeit bei einem Winkel von 20° zwischen den einzelnen Schauerstrahlen. Bei den vorliegenden Messungen ist die Treffwahrscheinlichkeit auf Schauer schon bei dem Winkel von nur 5,5° nach beiden Seiten aus der Vertikalen sehr gering (Tab. 12). Sie ist in dieser Anordnung 35% von derjenigen, bei der die beiden Rohre nach einer Seite aus dem Hauptstrahlengang herausgerückt sind. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit der Kurve (Abb. 1), die für 3fach-Koinzidenzen die Schauerhäufigkeit in Abhängigkeit von dem Winkel zwischen der Vertikalen und dem Schauerstrahl angibt. Dagegen zeigt sich keine Übereinstimmung zwischen dieser Kurve und den letzten Messungen (Tab. 12, Zeile 3). Nach Abb. 1 wäre eine viel stärkere Abnahme der Treffwahrscheinlichkeit zu erwarten, als nach Tab. 10 und 12 gefunden wurde. Diese Diskrepanz deutet darauf hin, daß ein großer Teil ebenfalls gestreuter Strahlen

die Zählrohre 1—4 noch sämtlich treffen und so als geradlinig verlaufend im Sinne obiger Zerlegung gezählt werden. Es sind deshalb weitere Versuche geplant, bei denen der Durchmesser der benutzten Zählrohre variiert werden soll, um den Einfluß der Zählrohrdimensionen auf das Verhältnis zwischen geradlinigen und Schauerstrahlen zu ermitteln und weitere Aussagen über die Winkel zu ermöglichen. Diese Messungen werden dann wahrscheinlich auch einen endgültigen Entscheid liefern, ob im Pb Schauer oder Wechselwirkungen zwischen Protonen und Neutronen wirksam sind.

b) *Durchdringungsfähigkeit*

Nach diesen Überlegungen über die Winkeldivergenz ist es nicht möglich, aus den vorliegenden Messungen auf den Absorptionskoeffizienten der Schauerstrahlung zu schließen, denn der Einfluß der Zählrohrdimensionen wird für die Messungen mit Pb größer sein als für die ohne Pb. Damit entfällt der sich zuerst aufdrängende Schluß, daß die geradlinigen und die gestreuten Strahlen in gleichem Maße absorbiert werden müßten, ein Schluß, der auch deshalb befremdet, weil bei den Messungen ohne Pb die weiche Komponente der Höhenstrahlung nicht ausgeschaltet war. Es ist geplant, die Messungen über den Einfluß der Materie auf die Streuung dahin zu ergänzen, daß auch leichtere Absorbermaterialien benutzt werden sollen. Wenn sich ein Absorptionskoeffizient für die Schauerstrahlung auch noch nicht angeben läßt, so ist sie jedenfalls sehr viel durchdringungsfähiger, als dies bisher von Schauern angenommen wurde. Zwischen dem obersten und dem untersten Rohr lagen 90 cm Pb, und selbst, wenn der primäre, schauerauslösende Strahl die Rohre 1 und 2 zum Ansprechen brächte, müßte der Schauer noch 60 cm Pb durchdringen, um die Rohre 3 und 4 zu treffen.

c) *Anzahl der Schauerstrahlen*

Aus den Überlegungen Abschnitt IV, 3 geht hervor, daß für jede 2fach-Koinzidenz zwischen den beiden äußeren Rohren, die nicht zugleich mit dem mittleren koinzidierte, außerhalb des ausgeblendeten Strahlenbündels ein ionisierender Strahl gefunden wurde. Andererseits zeigt diese Betrachtung auch, daß die Zahl der Schauerstrahlen je Schauer nicht viel größer als 1 sein kann, da sonst die Addition der verschiedenen 3fach-Koinzidenzen mehr als 100% der 2fach-Koinzidenzen hätte ergeben müssen. Auch das Ergebnis der Tab. 11, Zeile 2 steht mit dieser Anschauung im Einklang, denn es besagt, daß die Zahl der Schauer, die nach beiden Seiten aus der Vertikalen um einen beträchtlichen Winkel streuen, sehr gering ist. Diese Überlegungen

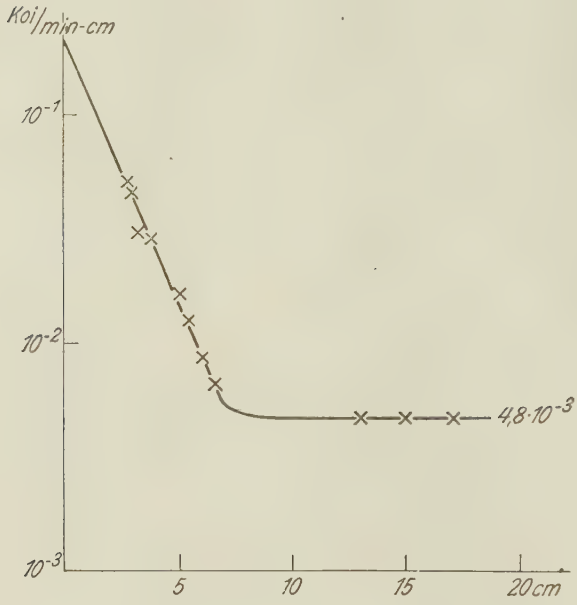

Abb. 7

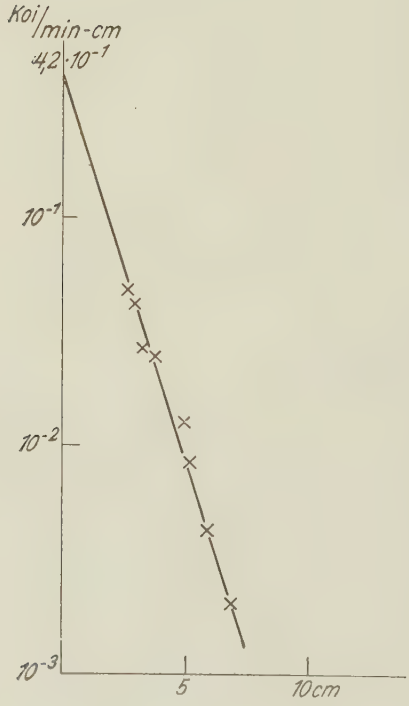

Abb. 8

sagen jedoch nichts aus über die Zahl der Strahlen in denjenigen Schauern, die mit der 4fach-Koinzidenzanordnung auch innerhalb des ausgeblendeten Strahlenbündels gefunden wurden.

Es soll nun versucht werden, mit Hilfe der Abhängigkeit der Treffwahrscheinlichkeit von der Winkeldivergenz, die für den Bereich außerhalb des ausgeblendeten Strahlenbündels durch Abb. 1 wiedergegeben wird, auch hierüber Aussagen zu ermöglichen. In Abb. 7 ist dieselbe Kurve noch einmal logarithmisch aufgetragen. Sie zeigt, daß die Treffwahrscheinlichkeit je Zentimeter Zählrohrdurchmesser von 2,9 bis etwa 7 cm exponentiell mit der Entfernung aus der vertikalen Achse abnimmt und dann in einen konstanten Wert übergeht. In Abb. 8 ist dieser erste Teil nochmals wiedergegeben, jedoch nach Abzug des konstanten Wertes. Die Treffwahrscheinlichkeit gehorcht demnach im Bereich $s = 2{,}9$ cm bis $s = 7$ cm einem Gesetz von der Form $w = Ne^{-\lambda s}$, worin $N = 0{,}42$ und $\lambda = 0{,}767$. Wird die Gültigkeit dieses Gesetzes auch für $s = 0$ bis $s = 2{,}9$ cm vorausgesetzt, so ergibt

die Integration $W_e = 2\int_0^\infty w \cdot d\,s = 2\int_0^\infty N\, e^{-\lambda s} \cdot d\,s = 0{,}64$ die Gesamtzahl der Schauerstrahlen je 2fach-Koinzidenz, deren Verteilung obigem Gesetz gehorcht. Zählt man dazu noch den konstanten Teil der Treffwahrscheinlichkeit ($4{,}8 \cdot 10^{-3}$ Koi/min^{-1} cm^{-1}) für den gesamten Panzerquerschnitt (40 cm) hinzu, also $W_k = 4{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 40 = 0{,}19$, so erhält man das Gesamtintegral über die Treffwahrscheinlichkeit $W = W_e + W_k = 0{,}83$. Dieses ist durch die Zahl der Schauer je 2fach-Koinzidenz $N' = 0{,}37$ (Tab. 10) zu dividieren, um die Anzahl der Schauerstrahlen je Schauer zu erhalten, also N/Schauer $= 2{,}2$. Da nach Abschnitt a) sehr wahrscheinlich $N' > 0{,}37$, dürfte dieser Wert für N/Schauer eher zu groß sein. Die Zahl der ionisierenden Strahlen im Schauer, die die horizontale Ebene des Zählrohres 2 durchsetzen, ist demnach für jeden einzelnen Schauer $\geqq 1$, im Mittel jedoch $\leqq 2{,}2$.

d) *Vergleich mit Ergebnissen anderer Autoren*

Rossi[8]) fand bei einer Anordnung, die der zuerst benutzten 3fach-Koinzidenzanordnung sehr ähnlich war, bei der er jedoch nur die 3fach-Koinzidenzen in vertikaler Anordnung der 3 Zählrohre (a) und in einer Anordnung mit einer geringen Verschiebung des mittleren Rohres aus der Vertikalen (b) ein ähnliches Meßergebnis, nämlich $b/a = 10\%$. Diese Anordnung diente ebenfalls dazu, zu prüfen, ob die Höhenstrahlung als Einzelstrahlen so starke Materieschichten wie 90 cm Pb zu durchdringen vermögen. Rossi deutete sein Ergebnis dahin, daß die 10% als gewöhnliche Schauer anzusehen sind und im übrigen jeder einzelne Strahl die 90 cm Pb durchdringt. Sein Ergebnis könnte jedoch ebensogut sowohl im Sinne der Bhabhaschen Wechselwirkungstheorie wie im Sinne der Schauertheorie gedeutet werden, wenn obige Voraussetzungen über die Eigenschaften der Schauer gemacht werden.

Wasiutyńska und Wertenstein[9]), die inzwischen die Bhabhasche Theorie mit Hilfe von zwei Arten von 4fach-Koinzidenzen geprüft haben, finden eine sehr kleine, und eher der erwarteten entgegengesetzte Differenz, was nach vorliegenden Messungen verständlich ist, da sie — nach ihrer Zeichnung zu schließen — mit ähnlichen Zählrohrdimensionen gearbeitet haben und sich dann bei gleichem Abstand der Zählrohre voneinander kein wesentlicher Einfluß des Bleies zeigt.

e) *Vergleich mit den theoretischen Ergebnissen über Schauer*

Was für ein Mechanismus der Streuung zugrunde liegen könnte, läßt sich nicht ohne weiteres entscheiden. Die gewöhnlichen Kaskaden-

schauer nach der Multiplikationstheorie von Bhabha und Heitler[10]) und von Carlson und Oppenheimer[11]) können zur Erklärung nicht herangezogen werden, da sie sich nicht über Bleischichten der verwendeten Stärke auswirken können.

Eher könnten die Explosionsschauer, die Euler[12]) und Euler und Heisenberg[13]) zur Erklärung der Hoffmannschen Stöße hinter dicken Materieschichten heranziehen, auch den hier beobachteten Effekt hervorrufen. Wenn bei diesen Explosionen vorwiegend schwere Elektronen oder auch Protonen und Neutronen entstehen, so können einzelne dieser sekundären Teilchen die geforderten Reichweiten haben, wenn auch ihre mittlere Reichweite nach den Messungen über Hoffmannsche Stöße erheblich kleiner angenommen werden muß. Euler und Heisenberg sprechen die Erwartung aus, daß bei den Explosionsschauern wegen ihrer großen Gesamtenergie kleine Winkeldivergenzen bevorzugt sind und weisen in diesem Zusammenhang auf die von Bothe und Schmeiser[14]) gefundene Spitzwinkligkeit der Schauer im zweiten Maximum der Rossikurve hin. Da bei der benutzten Anordnung (90 cm Pb zwischen den Zählrohren) nur die energiereichsten unter den Explosionsschauern erfaßt werden können, würde die außerordentlich kleine Winkeldivergenz in diesem Rahmen verständlich erscheinen.

Die geringe Anzahl der Strahlen je Schauer scheint jedoch eher mit der Deutung der beobachteten Erscheinung als Explosionsschauer im Widerspruch zu stehen, besonders da die Zahl der Strahlen je Schauer nicht in der Nähe des untersten Rohres, wo die Absorption sich am stärksten auswirken müßte, sondern in der Mitte zwischen dem oberen und dem unteren Zählrohr bestimmt ist. Die Überlegungen des Abschnitts VIII. 2. c) gelten allerdings nur für ionisierende Schauerstrahlen, und im Explosionsschauer könnten außerdem noch nicht ionisierende Schauerstrahlen wirksam sein. Jedenfalls zeigen die Überlegungen des Abschnitts VIII. 2. c), daß, wenn bei der beschriebenen Anordnung Explosionsschauer wirksam sind, die sehr harte Strahlen enthalten, diese nur eine begrenzte Zahl harter Strahlen enthalten, was auf eine obere Grenze der Gesamtenergie der Explosionsschauer deuten würde.

Andererseits sollten schwere Elektronen (analog zum Comptoneffekt) an schweren Teilchen gestreut werden können [Euler und Heisenberg[13])]. Auch eine solche Auffassung wäre mit den vorliegenden Messungen vereinbar. Bei der Auswertung der 4fach-Koinzidenzmessungen wurde eine Zerlegung der Koinzidenzen in geradlinig verlaufende Einzelstrahlen und Schauer vorgenommen. Ein Teilchen, das während seines Weges durch Materie mehrmals seine Richtung

um einen kleinen Winkel ändert, würde sich jedoch für diese Aufstellung genau wie ein Schauer verhalten. Die geringe Strahlendichte der „Schauerstrahlung" deutet sogar auf eine derartige Erklärung.

IX. Zusammenfassung

Mit einer 3fach- und einer 4fach-Koinzidenzanordnung in Seehöhe wurde gefunden, daß als 3fach-Koinzidenzen 76% und als 4fach-Koinzidenzen 69% der durch dieselbe geometrische Anordnung ausgeblendeten 2fach-Koinzidenzen gezählt werden, wenn 90 cm Pb zwischen das obere und das untere Zählrohr gepackt sind. Diese Erscheinung läßt zwei Deutungsmöglichkeiten zu.

1. 37% der härtesten Bestandteile der Höhenstrahlung, die in Seehöhe 90 cm Pb durchdringen, bestehen aus einem Gemisch von Protonen und Neutronen, von dem die Protonen etwa 36% ausmachen. Diese 37% sind zugleich derjenige Anteil der härtesten Komponente, der Schauer erzeugt, während die restlichen 63% an der Schauererzeugung nicht beteiligt sind.

2. Ein erheblicher, noch nicht genau angebbarer Bestandteil der bei vertikaler Anordnung der Zählrohre gemessenen Koinzidenzen ist auf Schauer zurückzuführen, die durch drei charakteristische Eigenschaften gekennzeichnet sind.

a) Der Winkel zwischen den einzelnen Schauerstrahlen ist extrem klein.

b) Sie sind außerordentlich durchdringungsfähig.

c) Die Strahlendichte im Schauer ist gering. Die mittlere Anzahl der ionisierenden Strahlen im Schauer ist $\leqq 2{,}2$.

Es ist auch möglich, anstatt der Schauer eine Mehrfachstreuung schwerer Elektronen an den schweren Teilchen der Materie zur Erklärung anzunehmen.

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit vom Sommersemester 1937 bis Wintersemester 1938/39 im Institut für Höhenstrahlenforschung der Universität Berlin, Berlin-Dahlem, ausgeführt. Herrn Prof. Dr. W. Kolhörster, auf dessen Anregung die Arbeit unternommen wurde, danke ich für das stets fördernde Interesse, das er ihrem Fortgang entgegengebracht hat, und für die freundliche Bereitstellung der Apparate.

Literatur

1) H. J. Bhabha, Nature **139**. S. 1021. 1937.
2) J. C. Mouzon, Rev. of Scient. Inst. **7**. S. 467. 1936.
3) W. Kolhörster, I. Matthes u. E. Weber, Naturw. **26**. S. 576. 1938.
4) A. Trost, Ztschr. f. Phys. **105**. S. 399. 1937.
5) B. Rossi, Phys. Ztschr. **33**. S. 304. 1932.
6) H. Geiger, Ergebnisse d. exakt. Naturw. **14**. S. 42. 1935.
6a) Held, nicht veröffentlicht, vgl. Geiger 6).
7) E. K. Heidel, Dissertation, Tübingen 1935.
8) B. Rossi u. G. Bottecchia, Ricerca Scientifica **1**. Jg. 5. S. 3. 1934.
9) Z. Wasiutyńska u. L. Wertenstein, Nature **142**. S. 475. 1938.
10) H. J. Bhabha u. W. Heitler, Proc. Roy. Soc. London **159**. S. 432. 1937.
11) J. F. Carlson u. J. K. Oppenheimer, Phys. Rev. **51**. S. 220. 1937.
12) H. Euler, Ztschr. f. Phys. **110**. S. 450 u. 692. 1938.
13) H. Euler u. W. Heisenberg, Ergebnisse d. exakt. Naturw. **17**. S. 1. 1938.
14) W. Bothe u. K. Schmeiser, Naturw. **25**. S. 833. 1937; Ann. d. Phys. [5] **32**. S. 161. 1938.

Lebenslauf

Am 19. September 1912 wurde ich, Ilse Matthes, als Tochter des inzwischen verstorbenen Reichsbahnbetriebsingenieurs Robert Matthes und seiner Ehefrau Gertrud geb. Schwenzig, zu Altena (Westfalen) geboren. Seit 1913 in Berlin lebend, besuchte ich von April 1919 ab zuerst das Lyzeum II in Berlin-Steglitz, dann das Hohenzollernlyzeum in Berlin-Halensee und schließlich die Viktoria-Luisen-Schule in Berlin-Wilmersdorf, ein Oberlyzeum der Oberrealschulrichtung, wo ich im Frühjahr 1932 die Reifeprüfung ablegte. Im April 1932 ließ ich mich bei der Friedrich-Wilhelms-Universität in Berlin immatrikulieren und widmete mich dem Studium der Mathematik, Physik und Chemie.

Meine akademischen Lehrer waren: Bieberbach, Bodenstein, Czerny, Feigl, Klose, Kohler, Kolhörster, Möglich, Nernst, Orthmann, Philipp, Schlenk, Erhard Schmidt, Thilo, Thiede, Wehnelt.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig 235/39